

## 고속 절삭가공시 절삭열의 거동에 관한 연구

주 호 윤\* · 이 용 성\*\*

(1997년 6월 27일 접수)

### A Study on the Behaviour of Cutting Heat at High Speed Cutting Work

Ho Youn Joo and Yung Sung Lee

**Key Words :** High Speed Cutting Work(고속 절삭가공), Cutting Heat(절삭열)

#### Abstract

It is generally known that in high speed work with more than 1000 m/min cutting speed, according to the work material phenomenon of tool wearing is increased due to the some produced neat and as a result this makes the cutting work impossible. In this study, the high speed cutting is possible because of the different cutting from the presently known fact. That is, most of generated heats influence on the quantity flowing in chip greatly. Therefore, this study aims at the behavior of cutting heat generated at high speed cutting. It makes cleary the quantity of heat flowing in chip, work material, tool, and inflowing ratio. The cutting mechanism varies by the changing of cutting depth, slant face and contact area through this study. And it is examined that the influence of heat of all parts is greatly due to the change the contact length of clearance face. It is confirmed from the experiment that the inflowing heat ratio influences the cutting speed greatly and the heat of clearance face can not be disregarded.

#### 기 호 설 명

- $A_1$  : 전단면적 [ $m^2$ ]
- $A_2$  : 공구와 칩의 접촉면적 [ $m^2$ ]
- $A_3$  : 공구와 피삭재의 접촉면적 [ $m^2$ ]
- $Q$  : 총열량 [W]
- $Q_c$  : 칩으로 유입하는 열량 [W]
- $Q_r$  : 공구로 유입하는 열량 [W]
- $Q_w$  : 피삭재로 유입하는 열량 [W]
- $q_1$  : 전단면에서 단위시간, 단위면적당 발생하는 열량 [ $W/m^2sec$ ]
- $q_2$  : 공구와 칩 접촉면에서 단위시간, 단위면적당 발생한 열량 [ $W/m^2sec$ ]
- $q_3$  : 공구와 피삭재에서 단위시간, 단위면적당 발생한 열량 [ $W/m^2sec$ ]

- $R_1$  :  $q_1$ 이 칩으로 유입하는 비율 [%]
- $R_2$  :  $q_2$ 가 칩으로 유입하는 비율 [%]
- $R_3$  :  $q_3$ 가 피삭재로 유입하는 비율 [%]
- $\bar{\theta}_s$  : 전단면의 평균온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $\bar{\theta}_i$  : 공구와 칩 접촉면의 평균온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $\bar{\theta}_w$  : 마찰에 의한 여유면과 피삭재의 접촉면의 평균온도 [ $^{\circ}C$ ]

#### 1. 서 론

절삭공구면의 온도에 관한 연구는 오래 전부터 많이 연구되어 왔고, 특히 1950년부터 급속히 진행되어 왔다. 특히 Jeager 등<sup>(1)</sup>은 고체내의 열전도론이 발표된 후 1955년부터 Chao 등<sup>(2)</sup>에 의한 전단면의 평균온도 이론해석 및 접촉면의 온도에 대하

\*회원, 천안공업전문대학 금형과

\*\*회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

어 연구 발표되었다.

그리고 그후 Bishop<sup>(3)</sup>는 계산기를 이용한 해석법 Lee 등<sup>(4)</sup>은 정상상태에서 절삭온도의 분포와 3차원 해석방법의 제시 및 측정 그리고 Usui 등<sup>(5)</sup>이 Bishop의 해석방법을 응용한 수법이 보고되고 있으며, Shirakashi 등<sup>(6)</sup>은 탄소강 절삭에 있어서 구성인선 생성과정의 simulation 해법에 대한 연구에서 유한요소법에 의한 simulation 해석을 발표한 바 있다.

본 연구에서는 SM45C를 117 m/min~402 m/min의 절삭속도로 절삭할 때 발생하는 절삭열, 즉 chip으로 유입하는 열량과, 피삭재로 유입하는 열량, 그리고 공구로 유입하는 열량을 이론적으로 규명하고 실험결과와 비교 검토하고자 한다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 절삭열의 거동에 관한 열전도 이론

일반적으로 연성금속의 절삭에서 소모되는 에너지의 대부분은 전단면에서 칩이 만들어질 때 전단일, 공구 경사면과 칩과의 사이에서 마찰일, 공구 여유면과 피삭재 표면과의 사이에서 마찰일 등이며, 대부분이 열로 변환된다.

이것을 표면열원이라고 생각하고, Fig. 1과 같이 단위시간, 단위면적당의 발열량과 발열면적을 각각 정의한다.

또한 절삭이론에서는 공구마멸이 적을 때 공구, 칩, 접촉면의 발열을 무시할 수 있기 때문에 식 (1), (2), (3)과 같이 나타내었다.

$$q_c = R_1 q_1 + R_2 q_2 \tag{1}$$

$$q_t = (1 - R_2) q_2 \tag{2}$$

$$q_w = (1 - R_1) q_1 \tag{3}$$

본 연구에서는 기존이론에  $q_3 A_3$ 을 추가하여 생각한다.

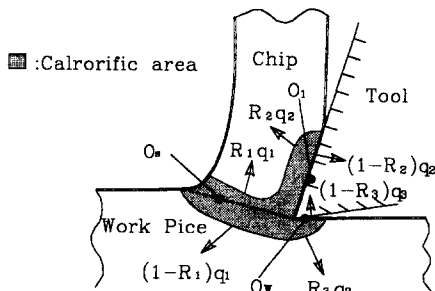


Fig. 1 Quantity of heat flowing in tool.

먼저 절삭온도의 해석에서 3개의 열원에서 발생한 절삭열이 칩, 피삭재, 공구에 유입한다고 가정한다.

전단면에서 발생하는 열량이 칩으로 유입하는 비율을  $R_1$ , 공구와 칩접촉면에서 발생하는 열량이 칩으로 유입하는 비율을  $R_2$ , 그리고 공구와 피삭재에서 발생하는 열량이 피삭재로 유입하는 비율을  $R_3$ 로 한다.

그리고 각각 별도로 모델화하고 그 접촉면의 온도가 같은 것으로부터  $R_1$ 이 구해지며, 같은 방법으로  $R_2, R_3$ 을 구한다.

다음에 Fig. 1에서 칩에 유입하는 단위시간, 단위면적당의 열량은  $R_1 q_1$ 과  $R_2 q_2$ 의 합이 되며, 단위시간당 칩에 유입하는 열량을  $Q_c$ 라고 하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

피절삭재( $Q_w$ )와 공구( $Q_t$ )에 대해서는 같은 모양으로 생각된다.

그래서 각각은 총 발열량  $Q$ 로 나눈 것을 각부에 유입비율로 한다.

$$Q_c = R_1 q_1 A_1 + R_2 q_2 A_2 \tag{4}$$

$$Q_w = (1 - R_1) q_1 A_1 + R_3 q_3 A_3 \tag{5}$$

$$Q_t = (1 - R_2) q_2 A_2 + (1 - R_3) q_3 A_3 \tag{6}$$

$$Q = Q_c + Q_w + Q_t \tag{7}$$

## 3. 실험장치 및 실험결과

### 3.1 실험장치

Fig. 2는 절삭열의 유입비율을 계산한 program list를 나타낸 것으로 먼저 전단면의 평균온도와, 칩·접촉면의 평균온도, 그리고 여유면과 피삭재 접촉면의 평균온도를 추정하고 그 값을 이용하여  $k$ 와  $c$ 를 구했으며, 계산온도와 추정치가 차이가 있으면 재계산하는 과정을 거쳤다.

실험은 Fig. 3과 같이 단열재로 감은 열량계에 1리터의 물을 넣어 절삭 중에 발생한 절삭열을 물에 흡수시킨다.

그 사이에 상승온도로부터 총 발열량을 구한다. 피절삭재는 기계구조용 탄소강 SM45C를 외경 32 mm 두께 1 mm의 파이프프로 만든 것이고, 엔드밀(TCB-390)로 가공하였다.

수온은 위치와 깊이를 다르게 한 4개의 센서로 측정하여 그 평균 상승온도를 사용한다.

또한 온도센서는 스텐레스로 만든 용기에 설치하

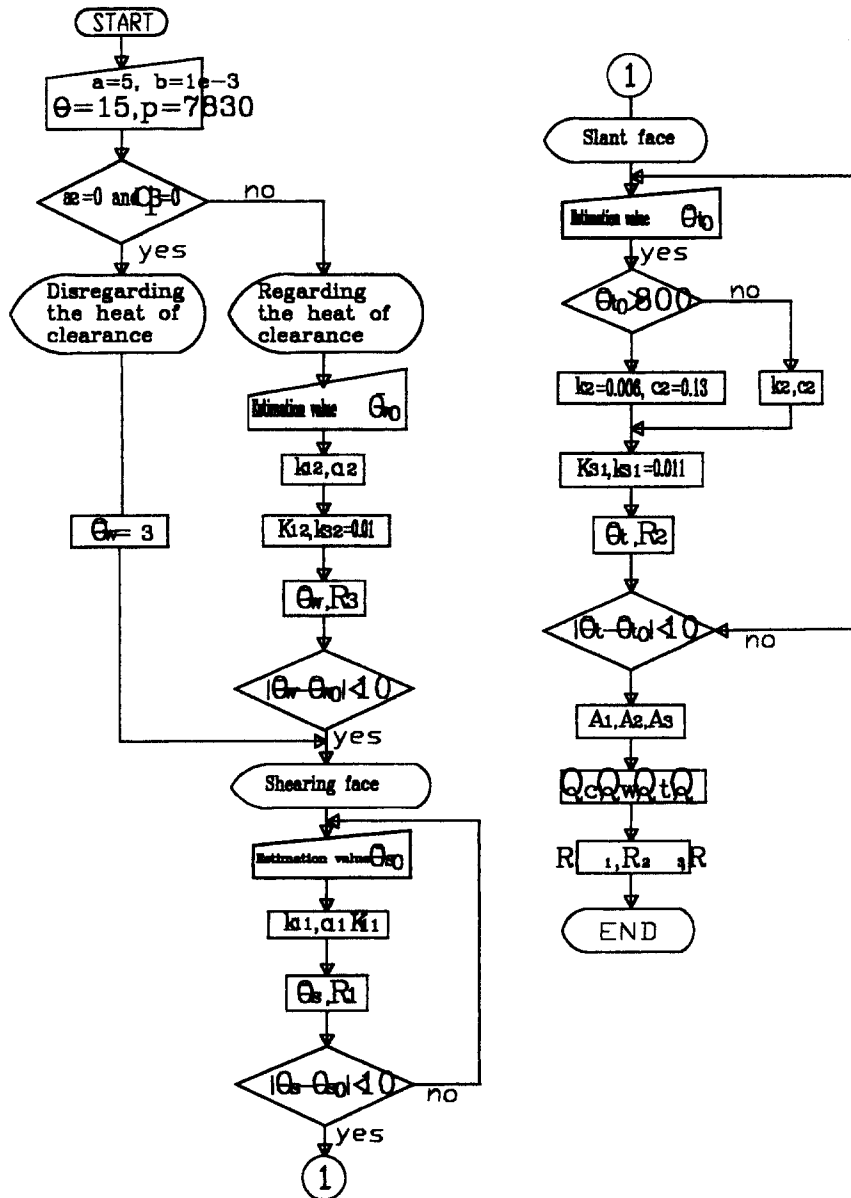


Fig. 2 Quantity of heat flowing in tool.

였으며, Pt-Rh의 열전대로 비교적 정도가 높고 1/1000°C의 분해능력을 갖도록 하였다. 또 절삭과 동시에 절삭저항으로서 스러스트와 토크를 동력계로 측정하여 절삭이론쪽에서도 발열량을 산출하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 상승온도의 측정결과

절삭중의 상승온도  $\Delta T$  [°C], 절삭시간  $\tau$  [sec], 그리고 열량계의 열용량  $M$  [J/kg · K]으로부터 총 발열량  $Q$  [W]는 다음과 같이 표시된다.

$$Q = \frac{M \cdot \Delta T}{\tau} \tag{8}$$

Fig. 4는 절삭속도 218 m/min, 이송 0.13 mm/rev일 때 노발땀에 있어서 절삭 상승온도를 측정한다.

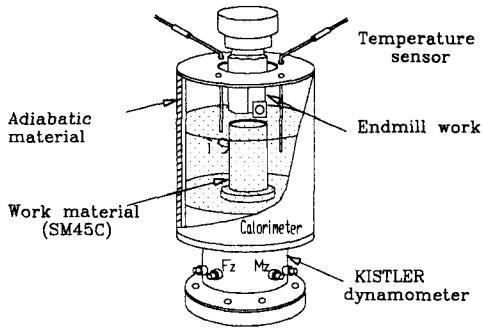
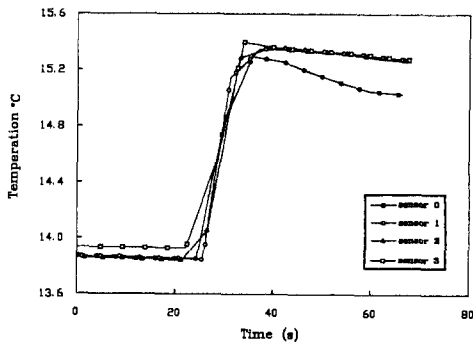


Fig. 3 Experimental apparatus.



Cutting speed : 21.8 m/min  
Feed : 0.13 mm/rev. at normal tip

Fig. 4 Cutting increase temperature at normal tip.

것이다.

이 조건에 있어서 4개의 센서의 상승온도를 평균하면 1.47°C가 되며, 이것을 절삭 상승온도로 한다.

또한 절삭중은 공구의 회전과 이송에 의한 교반에 의해서 수온은 균일하게 되지만 수온은 약간 상승한다.

이것을 고려해서 실험중의 상승온도를 절삭 상승온도와 교반 상승온도의 차로 하면 이 조건에서는 1.444°C이었다.

그리고 식 (8)에서 절삭시간이 7.25초 이었으므로 총 발열량은 976 w로 되었다.

### 3.2.2 여유면 접촉면적과 총 발열량의 관계

여유면 가공됨에 의한 실험에 대해서는 전단각이 일정하며 동일한 절삭기구로서 취급할 수 있으므로 실험에서 총발열량  $Q$ 를 측정하고, 아래의 식으로부터  $q_1, q_2, q_3$ 을 구했다.

Fig. 5는 여유면 접촉면적  $A_3$ 에 대한 총 발열량의 변화를 나타낸 것이다.

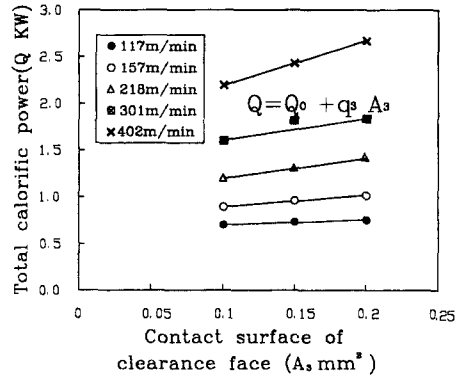
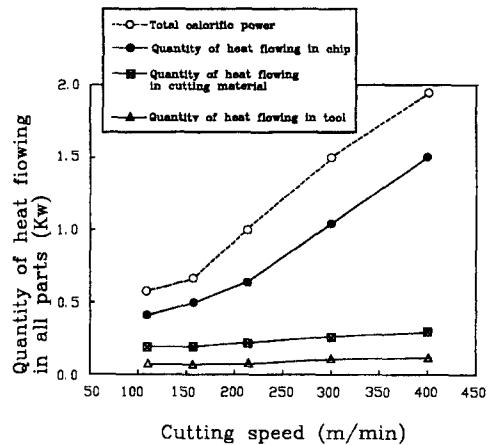


Fig. 5 Relation between the contact surface of clearance face and the total quantity of heat.



Work material : SM45C  
Tool : Carbide tip (p20), Slant angle 5°  
Clearance angle 6°  
Feed : 0.13 mm/rev.  
Cutting width : 1 mm

Fig. 6 Quantity of heat flowing in tool.

이 그래프의 기울기로부터 구해지고 이 직선을 연장해서 종축과 교차하는  $A_3=0$ 에 대한 값  $Q_3$ 가 구해진다.

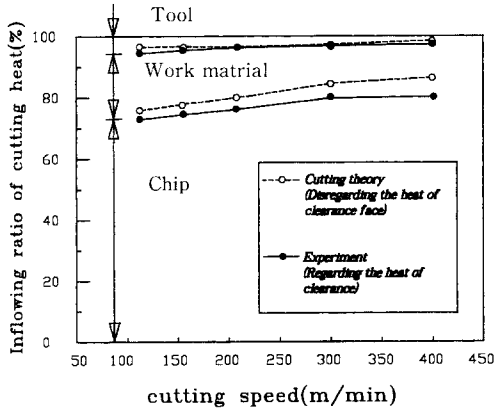
이것을 이용하여 전단면적  $A_1$ 경사면 접촉면적  $A_2$ 를 이용하면 실험에서 얻어진 단위 시간당의 총 발열량  $Q$ 는

$$Q = q_1 A_1 + q_2 A_2 + q_3 A_3 \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

$A_1$ 은 전단각으로부터  $A_2$ 는 접촉길이를 측정함으로써 얻을 수 있다.

나머지의  $q_1, q_2$ 는 노말팁 및 여유면 가공됨에



Work material : SM45C  
 Tool : Carbide tip (p20), Slant angle 5°  
 Clearance angle 6°  
 Feed : 0.13 mm/rev.  
 Cutting width : 1 mm

Fig. 7 Inflowing ratio into chip, work material and tool of cutting heat.

의한 실험결과중 2개를 조합해서 식 (9)의 형식으로 연립시켜 산출한다.

3.2.3 절삭열의 칩, 피삭재 및 공구로의 유입비율  
 본 실험에서 구한 절삭칩, 피삭재, 공구에 유입하는 열량은 Fig. 6과 같이 되었다.

절삭속도의 상승과 함께 각각의 열량이 증가하여 절삭칩에 유입하는 기율기가 가장 크다.

또한 Fig. 6과 같이 절삭면의 유입비율을 구하면 Fig. 7과 같이 되었다. 이것은 여유면의 발열유무에 의한 것으로 절삭이론으로부터 산출한 값과 상승온도로부터 산출한 값을 비교한 것이다.

양자 모두 절삭속도가 상승하면 칩으로 유입하는 비율은 증가하며, 피삭재와 공구로 유입하는 비율은 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한 피삭재의 유입비율에 대해서는 이론과 실험의 차가 조금씩 커지고 있다.

이는 고속이 됨에 따라 피절삭재와 접촉하는 여유면의 발열이 증가하기 때문이라고 생각된다.

본 연구는 SM45C로 절삭속도 400 m/min까지의 절삭열의 유입비율을 구할 수 있기 때문에 향후에는 피삭재를 알루미늄으로 바꾸어 절삭속도 1000 m/min까지의 절삭열의 거동을 규명할 예정이다.

## 4. 결 론

절삭속도 100 m/min-400m/min의 고속 절삭시에 발생하는 절삭열, 즉 칩으로 유입하는 열량, 피삭재로 유입하는 열량, 그리고 공구로 유입하는 열량 등의 절삭열의 거동을 이론적으로, 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭깊이나 경사면 접촉면적을 약간 변화시킴으로서 절삭기구가 변하게 된다.

(2) 여유면 접촉길이를 0.05 mm 간격으로 변화시킴에 따라 각부의 열량비율을 구할 수 있다.

(3) 절삭칩으로의 유입비율은 절삭속도의 상승과 함께 증가하며, 피삭재와 공구에 유입하는 비율은 감소한다.

(4) 고속으로 됨에 따라 여유면의 발열은 무시할 수 없게 된다.

## 후 기

본 연구에 적극적으로 협조하여 주신 일본 KANAZAWA 대학 M. Hirao 교수님께 감사드립니다. 또한 각 연구실의 동료 및 Toshiba 공구제작팀에게도 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Coralaw, H. S. and Jeager, J. C., 1948, "Conduction of Heat in Solidas," Clarendon Press Oxford. pp. 142.
- (2) Chao, B. J. and Trigger, K. J., 1955, "Temperature Distribution at the Tool-chip Interface in Metal Cutting," *Trans. ASME*, Vol. 77, No 7, pp 1107.
- (3) Bishop, J. F. W., 1956, "An Approximate Method for Determining the Temperatures Reached in Steady Motion Problems of Plane Plastic Strain," *Quart. J. Mech. and Appl. Math.*, IX, pp 236.
- (4) 李用成, 平元一之, 佐田登志夫, 1978, "定常切削における切削温度の解析と測定," 精密機械, 44권 12호, pp 1424 ~ 1430.
- (5) 白井英治, 白樫高洋, 北川武揚, 1975, "3次元切削温度分布의 數値解析," 精密機械, 41권, 12

- 호, pp 1424.
- (6) Schmidt, A. O., Gilbert, W. W. and Boston, O. W., 1945, "A Thermal Balance Method and Mechanical Investigation Machinability," *Trans of the ASME* 67.
- (7) Loewen, E. G. and Shaw, M. C., 1954, "On the Aanalysis of Cutting Tool Temperature," *Trans of the ASME*, 217.
- (8) Usu, E., Maekawa, K. and Shirakashi, T., 1981, "Simulation analysis of Built-up Edge Formation in Machining of Low Carbon Steel," *精密機械*, 47권 2호, pp 197~203.